



**Technische  
Universität  
Braunschweig**

**Projektarbeit**

# **Experiment am D-förmigen Stumpfkörper**

**Nora M. Bierwagen  
Tim Gotzel  
Amiriman Kianfar  
Kebria Kiani  
Florian Timm**

Ausgegeben: Institut für Strömungsmechanik  
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. R. Radespiel  
Technische Universität Braunschweig

Betreuer: M.Sc. Philipp Oswald, (TU Braunschweig)

Veröffentlichung: 1. Dezember 2018



# Zusammenfassung

evtl. eine Kurzzusammenfassung  
Ist das notwendig?



# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Stumpfkörperaerodynamik (TG)	2
2.1.1 Geometrische Einordnung	2
2.1.2 Strömungsbild	2
2.1.3 Praktische Bedeutung der Stumpfkörper	4
2.2 Coandă-Effekt (TG)	4
2.3 Aktive Strömungsbeeinflussung (NB)	4
<b>3 Versuchsvorbereitung (NB)</b>	<b>9</b>
3.1 Stumpfkörper	9
3.2 Rotierende Walzen	10
3.2.1 Zahnform	10
3.2.2 Anzahl der Zähne	12
3.2.3 Zahnöffnung	13
<b>4 Widerstandsbestimmung</b>	<b>15</b>
4.1 Bestimmung des Widerstands mittels des Impulssatzes	15
4.2 Effizienzbetrachtung und Impulskoeffizient	17
4.2.1 Impulskoeffizient	17
4.2.2 Leistungskoeffizient und Leistungsrate	18
<b>5 Windkanalversuche</b>	<b>20</b>
5.1 Windkanal	20
5.2 Versuchsaufbau	20
5.3 Messeinrichtung	20
5.4 Versuchsdurchführung	20
<b>6 Versuchsauswertung</b>	<b>21</b>
6.1 Messdaten	21
6.2 Vergleich mit Erwartungen	21
6.3 Vergleich zum Modell ohne Walzen	21
6.4 Effizienzbetrachtung	21
<b>7 Fazit</b>	<b>22</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>23</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>24</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>25</b>
<b>A Technische Zeichnungen (NB, TG)</b>	<b>26</b>
<b>B Messreihe</b>	<b>30</b>



# Nomenklatur

## Lateinische Bezeichnungen

*Str*          Strouhal-Zahl

## Griechische Bezeichnungen

## Indizes

## Abkürzungen

<i>NB</i>	<u>N</u> ora M. <u>B</u> ierwagen
<i>TG</i>	<u>T</u> im <u>G</u> otzel
<i>AK</i>	<u>A</u> miriman <u>K</u> ianfar
<i>KK</i>	<u>K</u> ebria <u>K</u> iani
<i>FT</i>	<u>F</u> lorian <u>T</u> imm
<i>rpm</i>	Umdrehungen pro Minute

# Kapitel 1

## Einleitung

kurze Einleitung Stumpfkörper  
aufbauend auf Masterarbeit  
Ziel der Arbeit

Da es sich bei diesem Dokument um eine Projektarbeit handelt, an der insgesamt fünf Personen mitgewirkt haben, stehen hinter jeder Kapitel- bzw. Unterkapitelüberschrift die Initialen des Autors. In Tabelle 1.1 ist eine Aufschlüsselung der Initialen gegeben.

Name	Initialen
Nora M. Bierwagen	NB
Tim Gotzel	TG
Amiriman Kianfar	AK
Kebria Kiani	KK
Florian Timm	FT

**Tabelle 1.1:** Initialen der beteiligten Personen



# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Stumpfkörperaerodynamik (TG)

Im folgenden Kapitel wird der Begriff der Stumpfkörper in Abgrenzung zu den schlanken Körpern eingeführt. Dabei soll im Besonderen auf das charakteristische Strömungsfeld eingegangen und die Charakteristiken des Nachlaufs spezifiziert werden.

#### 2.1.1 Geometrische Einordnung

Ein stumpfer Körper in einer Anströmung differenziert sich geometrisch von einem schlanken insofern, dass er eine signifikante Dicke quer zur Anströmung aufweist, welche in vergleichbarer Größenordnung wie die Abmessungen parallel zur Anströmung liegt. Als Maß kann das Dickenverhältnis  $\sigma$  als Kehrwert des Schlankheitsgrades  $\lambda$  herangezogen werden, welches das Verhältnis von Dicke zu Breite wiedergibt:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = \frac{d}{l} \quad (2.1)$$

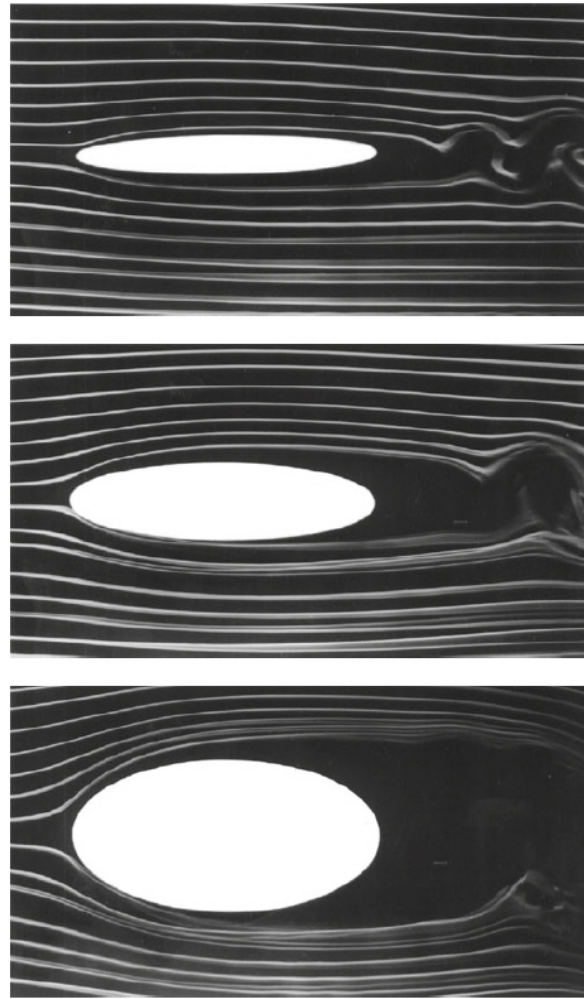
Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, verändert sich das Strömungsbild maßgeblich mit dem Dickenverhältnis  $\sigma$ , wobei der Übergang von schlanken zu stumpfen Körpern fließend ist.

Neben dem Dickenverhältnis kann ein diskontinuierlicher Verlauf der Körpergeometrie, wie dies beispielsweise bei der ausgeprägten Hinterkanten eines Fahrzeughecks der Fall ist, als geometrische Charakterisierung eines stumpfen Körpers herangezogen werden.

#### 2.1.2 Strömungsbild

Bei der Umströmung des Körpers kommt es zur Ausbildung einer Grenzschicht. Ein Teil der kinetischen Energie der Grenzschichtströmung wird durch Reibung an der Wand dissipiert. Die Geometrie eines stumpfen Körpers, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, führt gemäß Bernoulli zu einer Absenkung des statischen Drucks bis zur dicksten Stelle. Hinter dieser steigt der statische Druck wieder an, wobei die durch Reibung verringerte kinetische Energie nicht mehr ausreicht, um gegen diesen anzuströmen. Ist die kinetische Energie vollends in Druck umgewandelt, kommt es zur Rückströmung, wobei die Grenzschicht ablöst [6].

Der gleichen Argumentation folgend ist der Ablösepunkt an einer gegebenenfalls vorhandenen



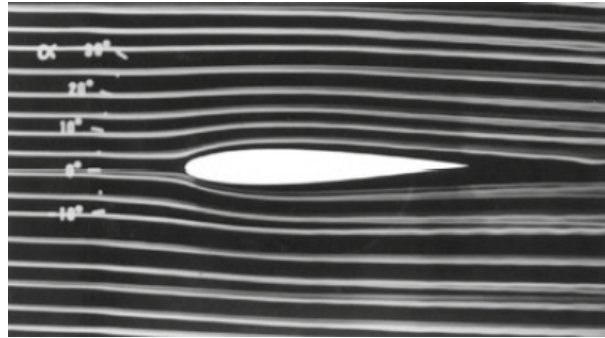
**Abbildung 2.1:** elliptische Zylinder unterschiedlicher Dickenverhältnisse im Rauchkanal [6]  
 oben  $\sigma = 0,13$   
 Mitte  $\sigma = 0,26$   
 unten  $\sigma = 0,5$

diskontinuierlichen Stelle der Körpergeometrie lokalisiert. In der Praxis ist dies häufig eine Hinterkante.

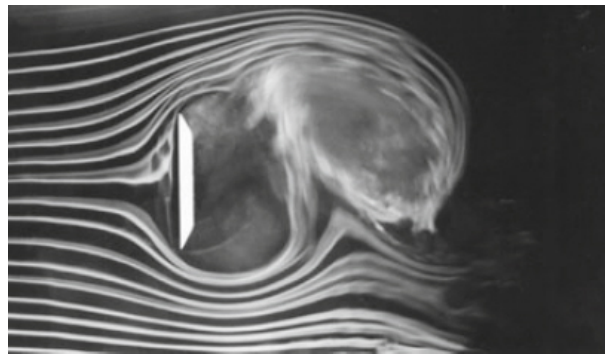
Das Ablösen hat die Ausbildung eines Totwassers zur Folge, in dessen Gebiet sich das Fluid bedingt durch Zähigkeitseffekte verwirbelt und Wirbelschichten ausbildet. Wie man in Abbildung 2.3 sehen kann, ist das Totwasser ein Charakteristikum des Strömungsbildes stumpfer Körper. Im Vergleich dazu ist dieses Gebiet beim Strömungsbild schlanker Körper, wie in Abbildung 2.2 zu sehen, nicht vorhanden, da hier ein nahezu störungsfreies Abströmen möglich ist.

Innerhalb des Totwassers existiert eine instationäre periodische Strömung, welche durch Druckschwankungen zu oszillierende Ablösungen führt. Diese Oszillation weist eine charakteristische Frequenz auf und wird durch die Strouhal-Zahl  $Sr$  beschrieben.

Die Wirbel innerhalb der turbulenten Strömung zerfallen kaskadenartig in kleinere Wirbel und dissipieren dabei ihre Energie in Wärme, bis sie sich gänzlich auflösen und sich erneut ein laminares Strömungsprofil ausbildet. Dennoch ergibt sich im Nachlauf des stumpfen Körpers eine Delle im Geschwindigkeitsfeld.



**Abbildung 2.2:** Stromlinienbild eines schlanken Körpers im Rauchkanal [6]



**Abbildung 2.3:** Stromlinienbild eines stumpfen Körpers im Rauchkanal [6]

### 2.1.3 Praktische Bedeutung der Stumpfkörper

tbd

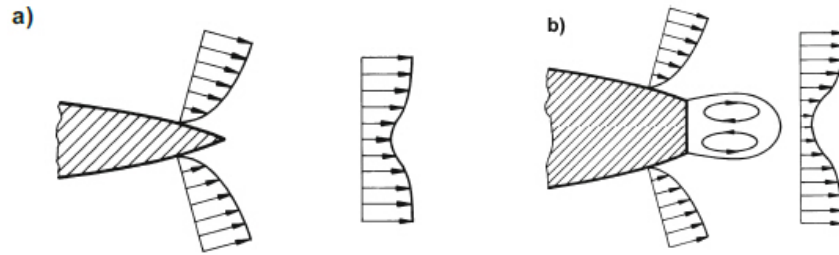
## 2.2 Coandâ-Effekt (TG)

Der Coandâ-Effekt tritt auf, wenn ein Strahl entlang einer Körperkontur strömt. Anders als die bisher betrachtete Strömung, kann die sogenannte Coandâ-Strömung des Strahles der Kontur einer konvexen Rundung folgen ohne abzulösen. Bei der normalen Anströmung führt die konvexe Rundung nach Bernoulli zu einer Verlangsamung der Strömung und demgemäß einer Druckerhöhung, was eine Rückströmung und Ablösung zur Folge hat. Dies wurde bereits in 2.1.2 diskutiert.

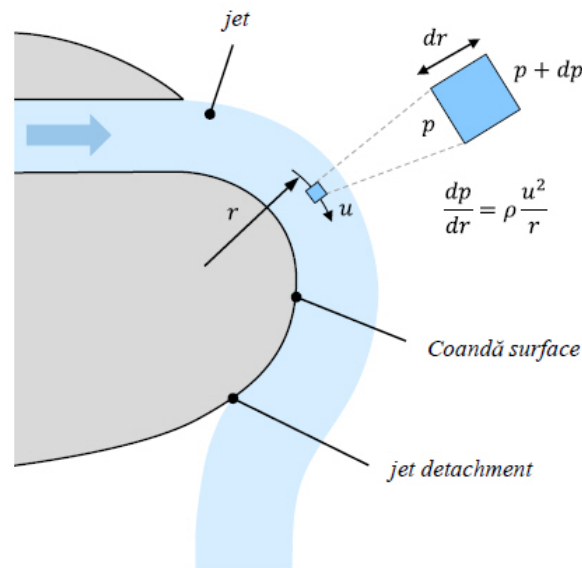
Da es sich bei der Coandâ-Strömung um einen Strahl handelt, gibt es zur Grenzschicht eine zusätzliche Reibungsschicht zum umgebenden Medium. Dies wird in Abbildung 2.5 gezeigt. Da das Umgebungsmedium ruht gibt es gemäß Bernoulli keinen Druckanstieg entlang der konvexen Rundung, die Grenzschicht bleibt stabil. Aus diesem Grund haftet die Coandâ-Strömung länger an Körperkontur an.

## 2.3 Aktive Strömungsbeeinflussung (NB)

Stumpfe Körper haben meist ein abruptes Ende, an dem sich strömungsmechanische Nachteile ergeben. Deshalb soll durch eine Anpassung der Geometrie des Körpers oder durch die strukturelle Veränderung des Totwassers dieser ausgeglichen werden. Ziel ist es, den Basisdruck anzuheben und darüber den Druckwiderstand des Körpers zu verringern [6].



**Abbildung 2.4:** Nachlauf eines a) schlanken Körpers und eines b) stumpfen Körpers [6]



**Abbildung 2.5:** Skizze zum Coandă-Effekt [10]

Die nachfolgende Arbeit konzentriert sich auf ein aktives Verfahren der Strömungsbeeinflussung, weshalb im folgenden einige bis jetzt realisierte Verfahren vorgestellt werden.

Bearman [6] hat als einer der ersten die aktive Strömungsbeeinflussung nachgewiesen. Abbildung 2.6 zeigt das verwendete Stumpfkörpermodell. Dabei ist als Besonderheit auf die poröse Basis hinzuweisen, durch die zusätzlich Luft am Ende des Körpers ausgestoßen wird.

Die austretende Luft sorgt dafür, dass die Strömungsablösung vom Körperende weggeschoben wird. Durch die erst weiter hinten stattfindende Verwirbelung, fällt der Widerstand des Körpers ab.

Geropp und Odenthal beschreiben in [4] Experimente zur Einblasung am Ende eines Kraftfahrzeuges über zwei Schlitze mit Nutzung des Coandă-Effekts (Abbildung 2.7).

Hierbei ist für die Beeinflussung der Grenzschicht die Ausblasung bei hohen Geschwindigkeiten erforderlich. Durch den Coandă-Effekt wird die eingeblasene Luft in das Todwasser umgelenkt, wo sie wieder abgesaugt wird. Dadurch wird der Druck hinter dem Fahrzeug erhöht und der Gesamtwiderstand verringert. Die Experimente zeigen, dass eine Druckerhöhung von 50% und eine Widerstandsverringerng um 10% möglich ist. Außerdem wird ein Energievorteil für moderate Ausblasgeschwindigkeiten mathematisch festgestellt.

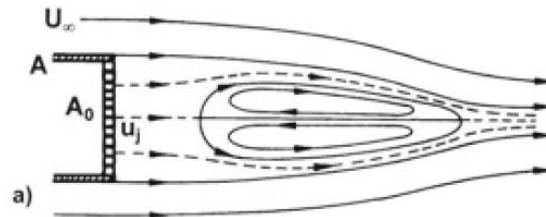


Abbildung 2.6: Stumpfkörper mit Ausblasung von Bearman [6]

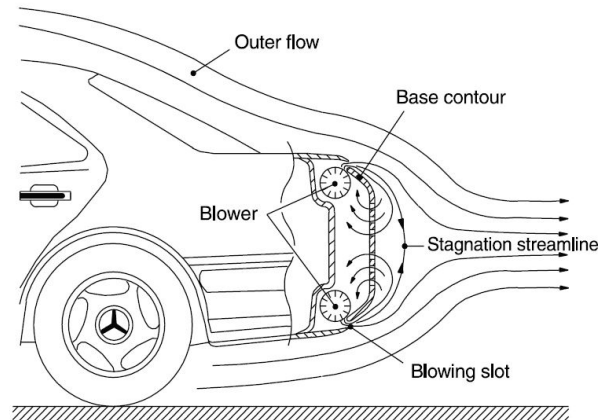


Abbildung 2.7: Stumpfkörper mit Ausblasung von Geropp [4]

In [1] wird zusätzlich zu den vorher beschriebenen Verfahren die Ausblasung gepulst durchgeführt. Dabei soll der Einfluss von Frequenz und Amplitude auf das Widerstandsverhalten untersucht werden.

In Abbildung 2.8 ist der schematische Aufbau der gepulsten Ausblasung dargestellt. Diese wird über Ventile realisiert, die eine Rechteckkurve mit einem duty cycle (weitere Erläuterungen in Kapitel 3.2) von 40% erzeugen. Direkt unter der Ausblasstelle wird zusätzlich noch eine Coanda-Fläche befestigt.

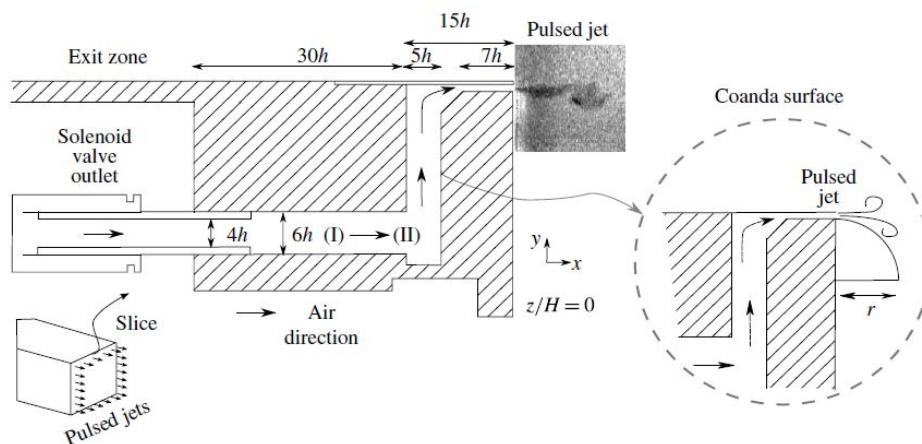
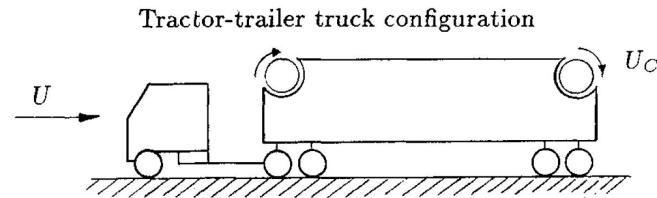


Abbildung 2.8: Ausblasung von [1]

Mit eher steigender Frequenz und steigender Amplitude, wurde eine Umlenkung der Grenzschicht beobachtet. Über eine gepulste Einblasung, nahe der natürlichen Ablösefrequenz der Strömung,

kann nach [1] der Widerstand am meisten (10%) gesenkt werden. Bei zusätzlicher Nutzung der Coandă-Fläche kann eine Reduktion von 20% erreicht werden.

Modi et al. [8] versucht durch drehende Zylinder an einem Truck den Widerstand zu reduzieren.



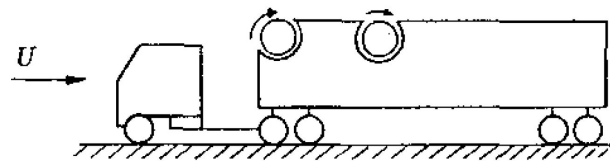
**Abbildung 2.9:** Erstes Truckmodell von Modi [8]

Dazu sind bei den ersten Windkanalversuchen die Zylinder angeordnet, wie in Abbildung 2.9 dargestellt. Bei dem ersten Versuch werden die Rauigkeiten der Zylinder variiert. Es gibt einen glatten Zylinder, einen mit einer Rauigkeit von 40 und einen mit 80. Außerdem wird das Verhältnis der Drehgeschwindigkeiten der Zylinder  $U_c$  bzgl. der Anströmgeschwindigkeit  $U$  für alle drei Fälle variiert. Daraus ergeben sich die Widerstandsreduktionen in Tabelle 2.1.

Zylinder	Widerstandsreduktion [%]	$U_c/U$
glatt	5	2
Rauigkeit 80	10	2.1
Rauigkeit 40	13	2.1

**Tabelle 2.1:** Widerstandsreduktion bei Modi

Da der hintere Zylinder keinen Impuls in die Grenzschicht einbringen kann, wurde ein zweites Experiment mit anderer Konfiguration durchgeführt. Dabei wurde ein Zylinder mit spiralförmiger Rille in der Oberfläche und einer mit einer Vielkeil-Verzahnung, deren Rillen parallel zur Drehachse verlaufen, verwendet. Die Position des ersten Zylinders bleibt unverändert, der Zweite wird ans Ende des ersten Drittels der Truckoberseite positioniert (siehe Abbildung 2.10).



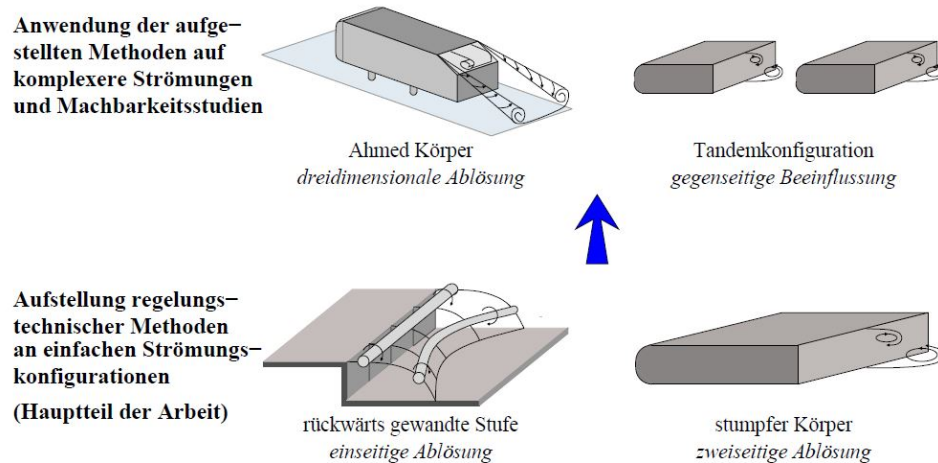
**Abbildung 2.10:** Zweites Truckmodell von Modi [8]

Der spiralförmige Zylinder erzielte das gleiche Ergebnis, wie der Zylinder mit einer Rauigkeit von 40 im ersten Experiment. Der Vielkeil-Verzahnungszylinder hat allerdings einen großen Einfluss auf den Widerstand. Bei alleiniger Betrachtung des vorderen Zylinders wird eine Reduktion von 29% erreicht, beide Zylinder erreichen bis zu 41%.

Alle bisher vorgestellten Verfahren haben nur eine Steuerung des Vorgangs betrachtet. In [5] wird jetzt zusätzlich eine Regelung des Mechanismus der Strömungsbeeinflussung eingeführt. Dabei möchte man äußere Störungen mit berücksichtigen, die zum Beispiel sich gegenseitig beeinflussende Kraftfahrzeuge aufeinander haben.

Im Rahmen der Arbeit [5] wurden unterschiedliche Körper (Abbildung 2.11) analysiert.

An der rückwärts gewandten Stufe wurde erfolgreich die Wideranlegelänge über einen segmentierten Schlitz an der Stufenkante geregelt. Außerdem konnte eine Unterdrückung von Störungen



**Abbildung 2.11:** betrachtete Modelle für Auslegung der Regelung [5]

erreicht werden. Das Ganze wurde über eine Robuste Regelung realisiert.

Am stumpfen Körper wurde mit Hilfe einer Phasenregelung an Ober- und Unterseite eine Widerstandsreduzierung von bis zu 15% erreicht.

Die Tandemkonfiguration wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie [5] untersucht und für zukünftige Arbeiten als sinnvoll betrachtet. Dabei geht es um die Störeinflüsse, die der erste Körper auf den zweiten hat und wie dieser die Störung über eine Regelung beseitigen kann, sodass auch beim zweiten Körper eine Widerstandsreduzierung möglich ist.

Die Regelung stellt einen weiteren Schritt in Bezug auf eine Widerstandsreduktion von Stumpfkörpern dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Regelung nicht mit betrachtet, da erst das neue Konzept untersucht werden muss. Dieses kann dann evtl. in Zukunft um eine Regelung erweitert werden.

## Kapitel 3

# Versuchsvorbereitung (NB)

Bevor der Versuch im Windkanal stattfinden kann, muss das Experiment vorbereitet werden. Dazu wird in diesem Kapitel der verwendete Stumpfkörper, sowie die Konstruktion der rotierenden Walzen genauer vorgestellt.

### 3.1 Stumpfkörper

Der D-förmige Stumpfkörper war im Rahmen dieser Arbeit vorgegeben, da er schon Bestand und weiter verwendet werden soll.

Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Zeichnung des Querschnitts des hier verwendeten Körpers. Die Modellhöhe  $h$  beträgt 53.4 mm, die Breite 390 mm und die Länge  $l$  190.6 mm.

Ein weiterer gegebener Modell-Parameter ist eine Stouhal-Zahl von 0,23 (nähere Erläuterungen in Kapitel 3.2).

Am rechten Ende des Körpers befinden sich zwei schematische Kreise, welche die rotierenden Walzen darstellen. Die Pfeile in den Kreisen geben die Drehrichtung an. Über die drehenden Walzen wird die Luft am Ende des Körpers in die Strömung eingeblasen. Eine genauere Beschreibung des Walzenaufbaus ist im folgenden Kapitel (Kapitel 3.2) gegeben.

Die rotierenden Walzen sind jeweils auf einer Welle gelagert und werden von Elektromotoren angetrieben. Die Elektromotoren haben eine maximale Drehrate von 3650 Umdrehungen pro Minute und eine minimale Drehrate von um die 100 Umdrehungen pro Minute.

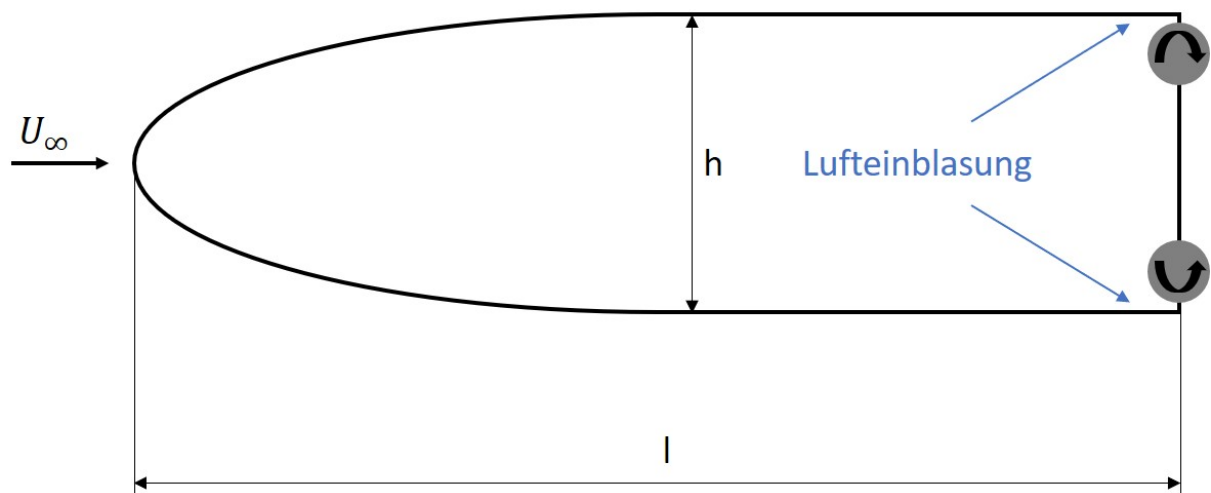


Abbildung 3.1: schematische Darstellung des Versuchsmodells



## 3.2 Rotierende Walzen

Die rotierenden Walzen erfüllen die Aufgabe, der gepulsten Einblasung in die Strömung am Ende des Stumpfkörpers.

Die Walzen bestehen aus einer Aluminium Innenwelle und einem mit Presspassung verbundenen Teflonrohr. In dem Teflonrohr ist die entscheidende Zahngeometrie eingebracht. Für Konstruktion des Teflonrohrs mussten folgende Aspekte betrachtet werden:

1. Zahnform
2. Anzahl der Zähne
3. Zahnöffnung

### 3.2.1 Zahnform

Die Zahnform hat Auswirkungen auf das gepulste Signal, das in die Strömung eingeführt wird. Als Grundlagen für die Signalform wurden folgende mathematische Funktionen (Abbildung 3.2) betrachtet.

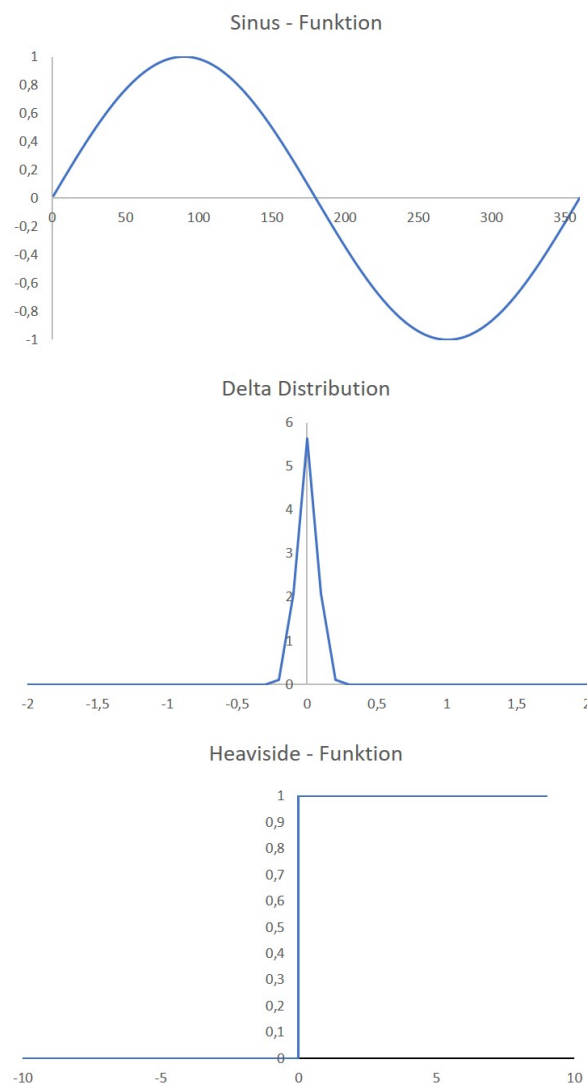


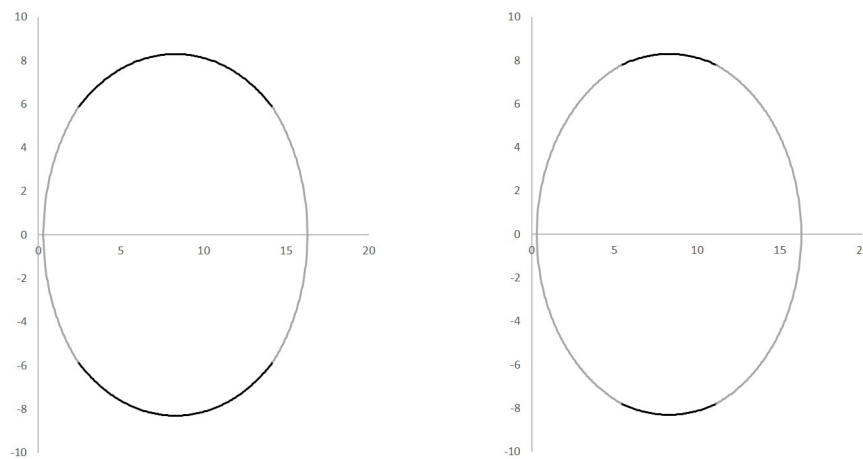
Abbildung 3.2: mathematische Funktionen für Zahnform

Für die Sinus Funktion eignet sich eher eine andere Form der Strömungsanregung, als die der drehenden Walzen. Diese kann besser über einen Null-Netto-Massenstrom-Jet-Aktuator [11] oder einen Lautsprecher dargestellt werden. Beide funktionieren über eine schwingende Membran, welche die Strömung anregt.

Ein Dirac-Impuls ist eine kurze Anregung der Strömung. Die Zeit in der die Luft in die Strömung eingeblasen wird, ist kurz im Vergleich zu der Zeit in der keine Anregung stattfindet. Damit könnte es zu einer nicht ausreichend großen Anregung kommen, die den gewünschten Effekt nicht induziert.

Eine Heaviside-Funktion stellt ein eindeutiges Signal dar, das entweder vollständig geschlossen oder geöffnet ist. Somit ist eine klare Definition des Zustands möglich.

Bei der endgültigen Wahl eines Signals ist der fertigungstechnische Aspekt ein weiterer wichtiger Parameter, der in diesem Fall die Wahl des Signals entschieden hat. Als finales Wellendesign wurden die zwei Wellen aus Abbildung 3.3 gefertigt. Diese wurden gewählt, da eine Fräsbearbeitung des Teflonrohrs zu Strömungsmechanisch ungünstigen Effekten geführt hätte. Der Fräser hat immer eine endliche Breite, sodass die Strömung durch die eventuell auftretenden minimalen Kanten zwischen den einzelnen Fräsbahnen gestört werden könnte. Somit wurde sich für eine Fertigung auf der Drehmaschine entschieden. Dabei wurden die Zahntäler über eine exzentrische Einspannung erreicht. Die Wahl für zwei Wellen wird im Folgenden näher betrachtet.



**Abbildung 3.3:** Querschnitt durch die finalen Walzen

Die Walzen Formen lassen sich über mehrere Kreisfunktion auf unterschiedlichen Intervallen darstellen (verschiedene Farben in Abbildung 3.3). Die linke Walze kann beschrieben werden über Gleichung 3.1.

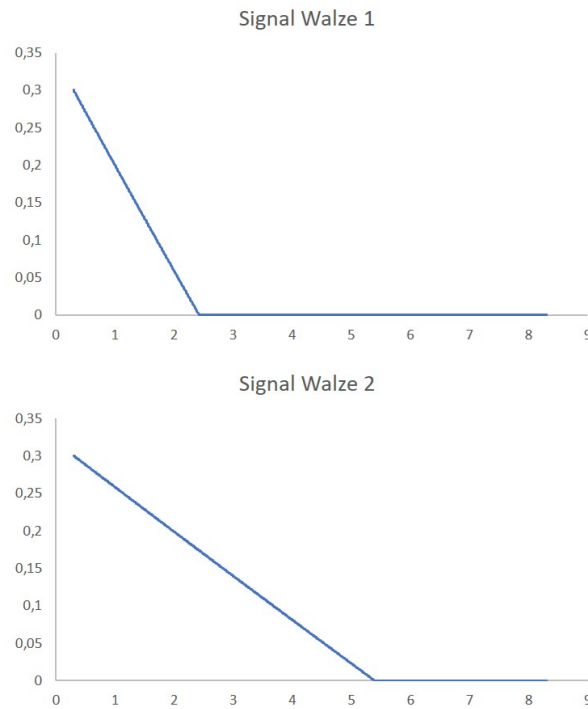
$$\begin{aligned} f_1(x) &= \pm \sqrt{9,15^2 - (x - 9,45)^2} & x \in [0, 3; 2, 42] \\ g_1(x) &= \pm \sqrt{8,3^2 - (x - 8,3)^2} & x \in [2, 42; 14, 18] \\ h_1(x) &= \pm \sqrt{9,15^2 - (x - 7,15)^2} & x \in [14, 18; 16] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Die rechte Walze kann beschrieben werden über Gleichung 3.2.

$$\begin{aligned} f_2(x) &= \pm \sqrt{8,48^2 - (x - 8,78)^2} & x \in [0, 3; 5, 39] \\ g_2(x) &= \pm \sqrt{8,3^2 - (x - 8,3)^2} & x \in [5, 39; 10, 61] \\ h_2(x) &= \pm \sqrt{8,48^2 - (x - 7,82)^2} & x \in [10, 61; 16] \end{aligned} \quad (3.2)$$

Aus der Form der Walzen, die die Zahnform darstellen, lässt sich rückwirkend auf die Signalform

schließen. Das Signal ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Ein Wert von 0.3 mm entspricht dabei einem offenen Signal, d.h. es wird Luft in den Spalt eingeblasen. Bei einem Wert von 0 mm findet keine Einblasung statt. In den Graphiken ist ein Signalverlauf für eine Viertelumdrehung der Walze dargestellt. Aufgrund von Symmetrie folgt im weiteren ein spiegelverkehrter Verlauf und danach eine periodische Fortsetzung, wie in Abbildung 3.5 dargestellt.

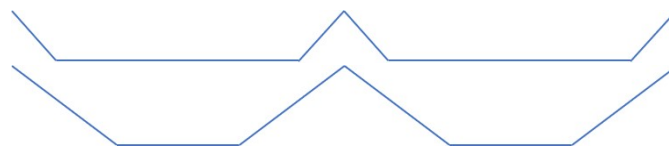


**Abbildung 3.4:** Signalverlauf der Walzen

Der lineare Verlauf der ersten Walze lässt sich annähern über Gleichung 3.3 und der der zweiten Walze über Gleichung 3.4.

$$l_1(x) = -0.14x + 0.3388 \quad (3.3)$$

$$l_2(x) = -0.059x + 0.31801 \quad (3.4)$$



**Abbildung 3.5:** Periodische Signale der Walzen

### 3.2.2 Anzahl der Zähne

Als zweites wird im folgenden auf die Entscheidung der Anzahl der Zähne detaillierter eingegangen. Ein ausschlaggebender Punkt ist dabei, dass die Einblasung mit einer Frequenz in Umgebung

der Ablösefrequenz der Strömung durchgeführt wird. Außerdem soll die Drehzahl der Elektromotoren nicht überschritten werden.

Die Ablösefrequenz der Strömung kann über die dimensionslose Strouhal-Zahl berechnet werden. Die Strouhal-Zahl ist nach [7] definiert als

$$Str = \frac{f * D}{U_{\infty}} \quad (3.5)$$

Hierbei ist  $f$  die Ablösefrequenz der Strömung,  $D$  die Profildicke im breitesten Querschnitt und  $U_{\infty}$  die Anströmgeschwindigkeit des Windkanals.

Wenn man Gleichung 3.5 nach der gewünschten Variable umstellt (siehe Gleichung 3.6) und die gegebenen Werte aus Tabelle 3.1 einsetzt, erhält man

$$f = \frac{Str * U_{\infty}}{D} = \frac{0,23 * 16 \text{ m s}^{-1}}{0.0534 \text{ m}} = 68.91 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

Parameter	Wert
Strouhal-Zahl	0,23
Anströmgeschwindigkeit	16 m s <sup>-1</sup>
Profildicke	53.4 mm

**Tabelle 3.1:** Modellwerte für Frequenzberechnung

Aus der Frequenz, die mindestens erreicht werden soll, kann nun berechnet werden, wie schnell sich die Walze mit welcher Zähnezahl drehen muss. Das Ergebnis für unterschiedliche Zähne findet sich in Tabelle 3.2.

Anzahl der Zähne	Drehgeschwindigkeit der Welle [Hz]	Drehgeschwindigkeit der Welle [rpm]
1	68,91	4134,6
2	34,46	2067,3
4	17,23	1033,65
6	11,49	689,1
8	8,61	516,83
10	6,89	413,46

**Tabelle 3.2:** Zähnezahlen mit zugehörigen Frequenzen

Aufgrund von Symmetrie und um dem möglichen Entstehen einer Unwucht entgegen zu wirken, wurde sich für eine gerade Zähnezahl entschieden. Durch die benötigte ausreichend große Lücke zwischen den Zähnen um einen effektiven Luftausstoß zu gewährleisten, wurde sich für eine Zähnezahl von zwei pro Walze entschieden.

### 3.2.3 Zahnöffnung

Als dritten Aspekt der Zahngestaltung wird im folgendem die Zahnöffnung betrachtet. Es wurden zwei Walzen mit zwei unterschiedlichen duty cycles gefertigt. Der duty cycle gibt den prozentualen Anteil der Zahnöffnung auf die gesamt mögliche Zahnöffnung (keine Zähne) an. Die Berechnungen des duty cycles für die erste Walze ist über Integration von Gleichung 3.1 und für

die zweite Walze von Gleichung 3.2 an einer Viertelwalze erfolgt. Für die Berechnungen wird das MATLAB Skript aus Abbildung 3.6 verwendet. Somit ergibt sich für die erste Walze ein duty cycle von 33% und für die zweite von 50%.

```
%Berechnung der Zahnöffnung
%Exzentrizität 1
f=@(x) sqrt((9.15.*9.15)-((x-9.45).*(x-9.45)));
q=integral(f, 0.3, 2.42);

%Exzentrizität 2
%f=@(x) sqrt((8.48.*8.48)-((x-8.48-0.3).*(x-8.48-0.3)));
%q=integral(f, 0.3, 5.39);

%Teil 2
g=@(x) sqrt((8.3.*8.3)-((x-8.3).*(x-8.3)));
r=integral(g, 2.42, 8.3); %Schnittpkt anpassen

%Außenkreis 16,6mm
h=@(x) sqrt((8.3.*8.3)-((x-8.3).*(x-8.3)));
s=integral(g, 0, 8.3);

%Innenkreis 16mm
t = pi.* 8.*8 / 4;

%freie Fläche
zahnf=q+r-t;
spaltf=s-t-zahnf;

prozent = spaltf / (s-t);

%Ausgabe
disp(['Zahnöffnung ' num2str(prozent)]);
```

**Abbildung 3.6:** MATLAB Skript zur Berechnung der Zahnöffnung

# Kapitel 4

## Widerstandsbestimmung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, festzustellen, ob die hybride aktive Strömungsbeeinflussung von stumpfen Körpern mittels gepulster Druckluftjets über zwei rotierende Coandă-Walzen mit kleiner Zahnzahl an der Körperrückseite eine nennenswerte Widerstandsreduktion gegenüber dem Fall ohne Beeinflussung erzielt.

Hierzu muss aus den Versuchsdaten einerseits die jeweiligen Widerstandswerte des Körpers bestimmt werden. Andererseits ist es erforderlich, abzuschätzen, ob diese Form der Strömungsmodifikation unter dem Schlussstrich Energie einsparen kann oder für die Aktuationsmechanismen möglicherweise sogar mehr Energie aufgewandt werden muss, als an Einsparung gewonnen werden kann. Zusätzlich ist es von Interesse zu bestimmen, wie groß der Impuls ist, der durch die Aktuation in die Strömung eingebracht wird.

Die Gleichungen für diese Zwecke sollen in diesem Kapitel hergeleitet und erläutert werden.

### 4.1 Bestimmung des Widerstands mittels des Impulssatzes

Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich eng an Hucho [6].

Der Widerstand eines stumpfen Körpers innerhalb einer Strömung macht sich als Impulsverlust derselben stromabwärts bemerkbar. Der gesuchte Widerstand kann somit bestimmt werden, in dem der Geschwindigkeitsverlauf der Strömung im Nachlauf betrachtet und mittels des Impulssatzes ausgewertet wird.

Um den Geschwindigkeitsverlauf zu bestimmen, können mehrere Methoden angewandt werden, wobei im Rahmen dieser Arbeit die Geschwindigkeiten aus den dynamischen Drücken ermittelt werden.

Der Messrechen im Nachlauf liefert hierzu diverse Drücke - statische und dynamische.

Damit wir unser vereinfachtes mathematisches Modell auf die Versuchsdaten anwenden können, müssen die Drücke der einzelnen Sonden in der Form

$$\bar{p} = \sum_{i=0}^n \frac{p_i}{n} \quad (4.1)$$

zeitlich gemittelt werden. Die Summe aller über einen Zeitraum genommenen Drücke  $p_i$  wird hierbei durch die Anzahl  $n$  dieser Drücke innerhalb dieses Zeitraums geteilt.

Über den die Definition des dynamischen Drucks  $q$  bzw. den Zusammenhang

$$u_1(y) = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_g - p_\infty)} = \sqrt{\frac{2}{\rho}q(y)} \quad (4.2)$$

lässt sich wie oben beschrieben der Geschwindigkeitsverlauf aus den gemessenen Drücken bestimmen.

Wobei  $u_1$  die Strömungsgeschwindigkeit im Nachlauf in Abhängigkeit der  $y$ -Koordinate und  $q$  der gemessene dynamische Druck ist.

Der Widerstand des Körpers selber lässt sich nun finden, wenn ein Kontrollvolumen wie in Abbildung ?? um den Körper gelegt und eine Impulsbilanz aufgestellt wird [6]. Es wird im Folgenden vereinfacht von einer horizontalen, inkompressiblen 2D-Strömung ausgegangen und der Impulssatz in  $x$ -Richtung

$$\rho \int_{(K)} v_x dQ = F_{Kx} + F_{Px} + F_{Sx} \quad (4.3)$$

betrachtet.

Die Dichte der umströmenden Luft wird hierbei mit  $\rho$  bezeichnet. Zudem entspricht in Gleichung 4.3  $F_{Kx}$  den angreifenden Volumenkräften,  $F_{Px}$  der am freien Teil des Volumen angreifenden Oberflächenkräf (Druckkraft) und  $F_{Sx}$  der Stützkraft.

Die Volumenkraft  $F_{Kx}$  kann dabei zu null gesetzt werden, da die Strömung in Richtung  $x$  horizontal verläuft und auch abgesehen von der Gewichtskraft keine anderen Volumenkräfte wirken.

Wenn das Kontrollvolumen, wie es in Abbildung ?? zu sehen ist, weit genug ab vom Körper gelegt ist, herrscht an den Begrenzungsändern AD, BC, AB und DC der konstante Druck  $p_\infty$ . Dies resultiert in einer Druckkraft  $F_{Px} = 0$ , da sich die Kräfte an den Rändern aufheben.

Die Stützkraft kann nun also dem Nettoimpulsfluss gleichgesetzt werden:

$$\rho \int_{(K)} v_x dQ = -\rho b \int u_1(u_\infty - u_1)dy = F_{Sx}. \quad (4.4)$$

Hier ist  $b$  die Breite des Modells senkrecht zur Zeichenebene und  $U_\infty$  die Geschwindigkeit der umgestörten Anströmung.

Die Stützkraft des festen Teils des Kontrollvolumens - also des Stumpfkörpers - hängt mit dem Widerstand in der Form

$$W = -F_{Sx} \quad (4.5)$$

zusammen.  $W$  ist also gleich der Stützkraft mit negativem Vorzeichen.

Daraus folgt der Ausdruck für den Widerstand zu

$$W = \rho b \int u_1(u_\infty - u_1)dy. \quad (4.6)$$

Der Widerstand lässt sich dimensionslos und somit vergleichbarer über den Widerstandsbeiwert  $C_w$  ausdrücken. Dieser ist als

$$C_w = \frac{W}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 b d} \quad (4.7)$$

definiert.

Nach Einsetzen der Gleichung 4.6 ergibt sich für den Widerstandsbeiwert

$$C_w = \frac{2}{U_\infty^2 d} \int u_1 (U_\infty - u_1) dy. \quad (4.8)$$

Die Integrationsgrenzen müssen an die vertikale Ausdehnung der Sonden am Messrechen im Nachlauf angepasst werden.

Mit Hilfe dieser Formeln kann dann ein mögliche Reduktion des Widerstandsbeiwertes festgestellt werden.

Diese Vorgehensweise ist legitim, wenn an der Messstelle im Nachlauf näherungsweise angenommen werden kann, dass der statische Druck wieder  $p_\infty$  entspricht und sich die Druckterme im Impulssatz auf beiden Seiten des Kontrollvolumens gegenseitig aufheben. Wird die Nachlaufdelle hingegen näher am Körper gemessen, weicht der dort gemessene statische Druck von  $p_\infty$  ab. Dies kann nach *B.M. Jones*, wie sie beispielsweise bei *Schlichting* [9] zu finden ist, durch eine Korrektur berücksichtigt werden.

Hierbei werden die Drücke, die theoretisch an einem Querschnitt 1 weit genug weg vom Körper und somit von der statischen Druckabweichung herrschen, auf Drücke zurückgeführt, die näher am Körper tatsächlich gemessen werden. Der neue Querschnitt, bei welchem die Messung stattfindet, erhält den Index (2).

Der Widerstand in diesem Fall ergibt sich zu

$$W = 2b \int \sqrt{p_{t2} - p_2} (\sqrt{p_{t\infty} - p_\infty} - \sqrt{p_{t2} - p_\infty}) dy_2. \quad (4.9)$$

Wobei  $p_{t2}$  und  $p_{t\infty}$  dem Totaldruck im Nachlaufquerschnitt bzw. dem Totaldruck der ungestörten Anströmung entspricht.

Für den Widerstandsbeiwert erhält man

$$C_w = 2 \int_{(2)} \sqrt{\frac{p_{t2} - p_2}{q_\infty}} \left( 1 - \sqrt{\frac{p_{t2} - p_\infty}{q_\infty}} \right) d\left(\frac{y}{d}\right). \quad (4.10)$$

## 4.2 Effizienzbetrachtung und Impulskoeffizient

### 4.2.1 Impulskoeffizient

Der Impulskoeffizient  $C_\mu$  wird als Maß für die Intensität der Ausblasung verwendet [3] und ist im Falle von kontinuierlicher Ausblasung als

$$C_\mu = \frac{\dot{m}_{jet} \cdot U_{jet}}{\frac{1}{2} \rho_\infty^2 \cdot U_\infty \cdot A_{ref}} \quad (4.11)$$

definiert. Dabei entspricht  $\dot{m}_{jet}$  dem Massenstrom, der durch die Spalte ausgeblasen wird.  $U_{jet}$  bezeichnet die Geschwindigkeit dieses Ausblasestroms.  $A_{ref}$  wiederum dient als Bezugsfläche. Im



Fälle des getesteten Stumpfkörpers wird als  $A_{ref}$  die projizierte Fläche der Körperhöhe verwendet.[?] ]

Die Periodizität der Ausblasung kann zusätzlich im Impulskoeffizient berücksichtigt werden und führt auf die Form [2]

$$\langle C_\mu \rangle = \frac{\rho_{jet} \langle U_{jet}^2 \rangle A_{Spalt}}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2 A_{ref}}. \quad (4.12)$$

In Gleichung 4.12 steht der  $\langle \rangle$ -Operator für die jeweiligen zeitlichen Mittelwerte und  $A_{Spalt}$  bezeichnet die Fläche des Ausblasespalts.

Der Duty-Cycle des Signals der Walzen  $\alpha$  kann mit betrachtet werden. Daraus folgt für den Impulskoeffizient mit Berücksichtigung der Periodizität die Gleichung

$$\langle C_\mu \rangle = \alpha C_\mu \quad (4.13)$$

Mittels des Impulskoeffizienten kann die Effektivität der Ausblasung beschrieben werden. Auch für den Vergleich zwischen den untersuchten Walzenpaaren ist die Betrachtung des Impulskoeffizienten maßgeblich.

#### 4.2.2 Leistungskoeffizient und Leistungsrate

Eine alleinige Betrachtung und ein Vergleich der  $C_w$ -Werte für den Fall ohne Druckluftzuführung und rotierende Walzen, sowie den Fall mit aktiver Strömungsbeeinflussung ist allerdings nicht ausreichend.

Die durch eine Widerstandsreduktion bedingte Leistungseinsparung im Anwendungsfall könnte durchaus durch die extern aufzubringende Leistung für Druckluft und Walzenrotation ausgeglichen oder übertroffen werden, sodass letztendlich zusätzliche Energie aufgebracht und der Zweck der Anwendung verfehlt würde.

Ob diese Form der Strömungsbeeinflussung also eine reale Netto-Leistungseinsparung zur Folge hat, muss folglich durch andere Kennzahlen quantifiziert werden.

Zunächst verwenden wir für die Effizienzbetrachtung eine Leistungsrate  $PR$ , die als

$$PR = \frac{(W_0 - W) \cdot u_\infty}{\frac{1}{2} \dot{m}_j u_j^2 + 2P_M} \quad (4.14)$$

eingeführt wird.

Der Zähler drückt die eingesparte Widerstandsleistung des Falls mit aktiver Strömungsbeeinflussung im Vergleich mit dem neutralen Fall aus. Dieser Term quantifiziert somit, in welchem Umfang die Energiedissipation in der Strömung im zweiten Versuch reduziert wurde.

Der Nenner hingegen repräsentiert hingegen die Leistung welche dem Modell bzw. der Strömung von externer Quelle zugeführt werden muss, um den gewünschten Effekt zu erzielen.

Der erste Summand  $\frac{1}{2} \dot{m}_j u_j^2$  charakterisiert die kinetische Leistung der Druckluft-Jets, die durch die Spalte ausgeblasen werden. Diese Darstellung vernachlässigt, dass die Druckluftbeaufschlagung in den Leitungen Verluste mit sich trägt und auch der Kompressor selber keinen optimalen Wirkungsgrad besitzt. Somit handelt es sich bei diesem Term um die idealisierte Jet-Leistung.

Der zweite Summand trägt dem Zustand Rechnung, dass die rotierenden Walzen, die verschiedenen Widerstände erleiden, von zwei Elektromotoren angetrieben werden müssen. Diese Leistung wird mittels eines Leistungsmessgerätes ermittelt.

Des Weiteren wird als weitere Größe noch der Leistungskoeffizient  $C_{Power}$  benötigt, welcher als

$$C_{Power} = \frac{E_{jet}\dot{m}_{jet} + p_{jet}U_{jet}A_{jet} - (E_p\dot{m}_a + p_pU_pA_p)}{\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2 A_{ref}} \quad (4.15)$$

mit

$$E = c_v T + \frac{U^2}{2} \quad (4.16)$$

definiert ist.

Größen mit Indize  $p$  entsprechen dabei den Größen innerhalb des Plenums, in dem die Strömung nicht kontrahiert wird. Des Weiteren bezeichnet  $c_v$  die spezifische Wärmekapazität von Luft bei konstantem Volumen,  $T$  die Temperatur der Luft und  $U$  die Geschwindigkeit.

Dieser Koeffizient drückt das Verhältnis der aufzubringenden Leistung durch die Aktuation zur in der Anströmung vorhandenen Leistung aus.

## Kapitel 5

# Windkanalversuche

### 5.1 Windkanal

### 5.2 Versuchsaufbau

### 5.3 Messeinrichtung

### 5.4 Versuchsdurchführung

## Kapitel 6

# Versuchsauswertung

### 6.1 Messdaten

### 6.2 Vergleich mit Erwartungen

### 6.3 Vergleich zum Modell ohne Walzen

### 6.4 Effizienzbetrachtung

## Kapitel 7

## Fazit

# Literaturverzeichnis

- [1] D. Barros, Jacques Borée, Bernd R. Noack, Andreas Spohn, and Tony Ruiz. Bluff body drag manipulation using pulsed jets and coanda effect. *Journal of Fluid Mechanics*, 805:422–459, 2016.
- [2] T. Chabert, J. Dandois, and É. Garnier. Experimental closed-loop control of flow separation over a plain flap using slope seeking. *Experiments in Fluids*, 55(8):1, 2014.
- [3] Yosef El Sayed M., N. Beck, P. Kumar, R. Semaan, and R. Radespiel. Challenges in the experimental quantification of the momentum coefficient of circulation controlled wings. In A. Dillmann, G. Heller, E. Krämer, C. Wagner, S. Bansmer, R. Radespiel, and R. Semaan, editors, *New results in numerical and experimental fluid mechanics XI*, volume 136 of *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, pages 533–543. Springer, Cham, 2018.
- [4] D. Geropp and H.-J. Odenthal. Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the coanda effect. *Experiments in Fluids*, 28(1):74–85, 2000.
- [5] L. Henning. *Regelung abgelöster Scherschichten durch aktive Beeinflussung*. Phd thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, 2008.
- [6] W.-H. Hucho. *Aerodynamik der stumpfen Körper: Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis*. Strömungsmechanik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2., vollst. überarb. und erw. aufl. edition, 2011.
- [7] A. Leder. *Abgelöste Strömungen Physikalische Grundlagen*. Grundlagen und Fortschritte der Ingenieurwissenschaften / Fundamentals and Advances in the Engineering Sciences. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1992.
- [8] V. J. Modi, M. S. U. K. Fernando, and T. Yokomizo. Moving surface boundary-layer control - studies with bluff bodies and application. *AIAA Journal*, 29(9):1400–1406, 1991.
- [9] H. Schlichting and E. Truckenbrodt. *Aerodynamik des Flugzeuges: Erster Band: Grundlagen aus der Strömungstechnik Aerodynamik des Tragflügels (Teil I)*. Klassiker der Technik. Springer, Berlin and Heidelberg, 3. auflage edition, 2001.
- [10] K. Stadlberger. *Modelling and Performance Aspects of Coandă Flap Systems*. Phd thesis, Technische Universität München, München, 2016.
- [11] Y. Utturkar, R. Holman, R. Mittal, B. Carroll, M. Sheplak, and L. Cattafesta, editors. *A Jet Formation Criterion for Synthetic Jet Actuators*, volume nos. 2003-0001 to 2003-1143 (with omissions in numbering) of *AIAA papers*, Reston, VA, 2003. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	elliptische Zylinder unterschiedlicher Dickenverhältnisse im Rauchkanal [6] oben $\sigma = 0,13$ Mitte $\sigma = 0,26$ unten $\sigma = 0,5$ . . . . .	3
2.2	Stromlinienbild eines schlanken Körpers im Rauchkanal [6] . . . . .	4
2.3	Stromlinienbild eines stumpfen Körpers im Rauchkanal [6] . . . . .	4
2.4	Nachlauf eines a) schlanken Körpers und eines b) stumpfen Körpers [6] . . . . .	5
2.5	Skizze zum Coandă-Effekt [10] . . . . .	5
2.6	Stumpfkörper mit Ausblasung von Bearman [6] . . . . .	6
2.7	Stumpfkörper mit Ausblasung von Geropp [4] . . . . .	6
2.8	Ausblasung von [1] . . . . .	6
2.9	Erstes Truckmodell von Modi [8] . . . . .	7
2.10	Zweites Truckmodell von Modi [8] . . . . .	7
2.11	betrachtete Modelle für Auslegung der Regelung [5] . . . . .	8
3.1	schematische Darstellung des Versuchsmodells . . . . .	9
3.2	mathematische Funktionen für Zahnform . . . . .	10
3.3	Querschnitt durch die finalen Walzen . . . . .	11
3.4	Signalverlauf der Walzen . . . . .	12
3.5	Periodische Signale der Walzen . . . . .	12
3.6	MATLAB Skript zur Berechnung der Zahnöffnung . . . . .	14

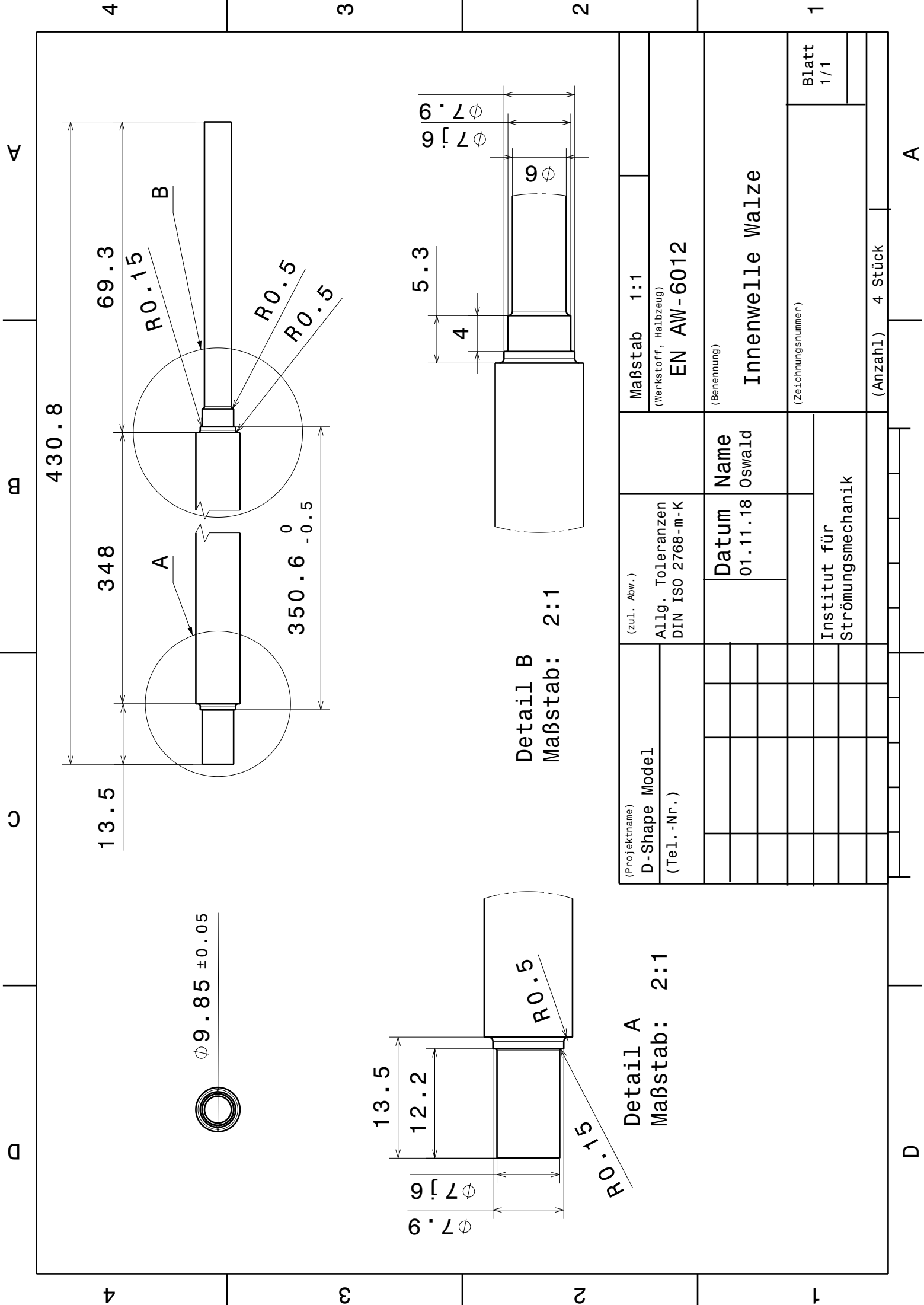
# Tabellenverzeichnis

1.1	Initialien der beteiligten Personen . . . . .	1
2.1	Widerstandsreduktion bei Modi . . . . .	7
3.1	Modellwerte für Frequenzberechnung . . . . .	13
3.2	Zähnezahlen mit zugehörigen Frequenzen . . . . .	13



## Anhang A

### Technische Zeichnungen (NB, TG)



A

B

C

D

4

4

3

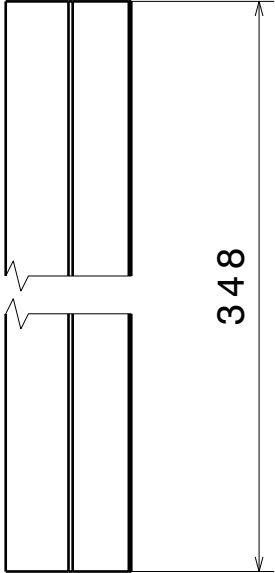
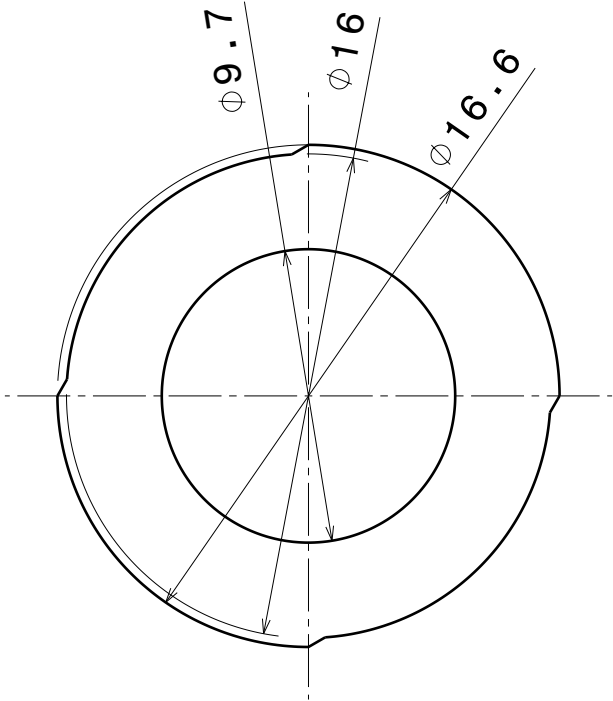
3

2

2

1

1



Maßstab 4:1

(Projektname) D-Shape Model (Tel.-Nr.)			(zul. Abw.) Allg. Toleranzen DIN ISO 2768-m-K		Maßstab 1:1		(Werkstoff, Halbzeug) PTFE
			Datum 01.11.18	Name Oswald	(Benennung)  gezahnte Welle 50%		
					(Zeichnungsnummer)		
			Institut für Strömungsmechanik		Blatt 1/1		
					(Anzahl) 2 Stück		

D

A



## Anhang B

# Messreihe

Text.